

Self-Anchored Cable -Suspension Bridge

张 哲 黄才良 王会利 石 磊 檀永刚 编著



自锚式斜拉 -悬索协作体系桥



大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press

Self-Anchored Cable -Stayed Suspension Bridge

张 哲 黄才良 王会利 石 磊 檀永刚 编著



自锚式斜拉 -悬索协作体系桥



大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

自锚式斜拉-悬索协作体系桥 / 张哲等编著. —大连 :
大连理工大学出版社, 2014. 5
ISBN 978-7-5611-9108-8

I. ①自… II. ①张… III. ①斜拉桥—悬索桥 IV.
①U448.25②U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 086086 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:http://www.dutp.cn

大连金华光彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm	印张:11.5	字数:278 千字
2014 年 5 月第 1 版	2014 年 5 月第 1 次印刷	

责任编辑:于建辉

责任校对:高 慧

封面设计:冀贵收

ISBN 978-7-5611-9108-8

定 价:38.00 元

前言

自锚式斜拉-悬索协作体系桥结构新颖,受力合理,具有抗风性能好,施工安全和工程造价低等优点,在软土地基、强风地区尤能突出其优越性,是一种新式大跨度桥型。

2005 年规划修建某跨海大桥,该桥跨越主航道,同时位于机场航线上。综合考虑航运、航空的要求,该桥跨径不能小于 800 m,塔高不能大于 174 m,因此须采用悬索桥形式。但是传统的地锚式悬索桥需要庞大的锚碇,而在海里修建锚碇造价高,施工困难。为此我们提出了自锚式斜拉-悬索协作体系桥型,该桥型结合了斜拉桥和悬索桥的优点,不需要锚碇,大幅度降低工程造价,具有安全、经济的优点。

2006 年,我们在大连庄河小寺河上设计了第一座自锚式斜拉-悬索协作体系桥,跨径 45 m+110 m+45 m。同年在大连马栏河上设计了跨度 134 m 的挑月桥。2006 年,我们获批了交通部西部交通科技项目“斜拉-悬索协作体系桥梁的研究”(2006 318 823 50)。我们采用理论分析和模型试验相结合的方式,对自锚式斜拉-悬索协作体系设计理论、关键构造和施工控制技术展开了系统的研究。

本书基于模型试验和实桥的设计和监控,对自锚式斜拉-悬索协作体系的静力行为、动力行为和抗震性能进行了系统的研究。主要内容如下:

(1)推导了不变形预张力的索力不变原理。在现有方法的基础上,基于几何非线性计算,结合该原理提出了自锚式斜拉-悬索协作体系桥合理成桥状态确定的分步算法。

(2)阐述自锚式斜拉-悬索协作体系桥的非线性特征,分析混凝土收缩徐变、矢跨比和拱度对协作体系的影响。考虑几何非线性影响因素,应用有限位移法分析一座主跨 800 m 的自锚式斜拉-悬索协作体系桥。得到不同矢跨比、不同拱度情况下,主要构件在汽车荷载作用下的弯矩和位移,以及混凝土收缩徐变对结构的影响。

(3)自锚式斜拉-悬索协作体系桥的动力特性主要包括体系的自振频率和主振型。以某跨海大桥为分析实例,通过建立空间有限元计算模型对其动力特性进行了分析,并与相同跨径和结构参数的地锚式斜拉-悬索协作体系桥进行了对比研究,总结了自锚式斜拉-悬索协作体系桥动力特性的特点。同时,针对该桥主跨主缆易于振动的特点,提出了采用斜向交叉拉索的抑振措施,并给出了合理的设置位置。

(4)引入精确高效的虚拟激励法,对自锚式斜拉-悬索协作体系桥在随机地震荷载作用下的地震响应进行了系统的研究。重点考查 P 波、SH 波和 SV 波这三种类型地震波作用下多点激励和地震动的空间变化效应,以及阻尼的变化对该新型体系内力和位移峰值响应的影响。

(5)采用人工生成的地震波,对某跨海大桥在纵向、竖向和横向地震波作用下进行了线性和非线性地震响应研究,对比分析了线性和非线性条件下主梁、主塔和边墩等主要控制截面的内力和位移响应时程结果,并对其影响规律进行了详细的讨论。

(6)以大连湾跨海大桥推荐方案为原型,进行全桥模型试验分析,验证有限元计算中的各种模拟与假定的正确性,为同类型桥梁的研究提供参考。以大连星海湾挑月桥为原型,进行全桥模型试验分析,模拟全桥吊杆张拉过程,指导实桥调索施工。

(7)介绍两座自锚式斜拉-悬索协作体系桥——庄河建设大桥、大连星海湾挑月桥。

目前国内外关于自锚式斜拉-悬索协作体系桥的相关文献寥寥无几,而该桥型在特定条件下有其独特的优势。为了系统介绍和推广这种桥型,特编写本书,以飨读者。

由于作者水平有限,错漏和谬误在所难免,恳切希望读者提出宝贵意见。

编 者

2014年5月

目 录

第 1 章 绪 论 / 1

1.1 斜拉-悬索协作体系桥的发展及研究现状 / 3

1.1.1 代表体系 / 3

1.1.2 国内外协作体系桥及方案 / 6

1.2 自锚式斜拉-悬索协作体系桥的研究现状 / 9

1.2.1 结构形式特点 / 9

1.2.2 自锚式斜拉-悬索协作体系桥及方案 / 10

第 2 章 自锚式斜拉-悬索协作体系桥静力行为分析 / 13

2.1 合理成桥状态确定 / 13

2.1.1 引 言 / 13

2.1.2 斜拉桥和悬索桥合理成桥状态的确定方法 / 13

2.1.3 自锚式斜拉-悬索协作体系桥合理成桥状态的确定原则 / 15

2.1.4 不变形预张力的索力不变原理 / 16

2.1.5 大跨度自锚式斜拉-悬索协作体系桥合理成桥状态确定的算法 / 19

2.1.6 算例分析 / 26

2.1.7 小 结 / 31

2.2 自锚式斜拉-悬索协作体系桥设计探索和力学性能研究 / 31

2.2.1 引 言 / 31

2.2.2 主缆和斜拉索垂度效应 / 32

2.2.3 大位移效应 / 36

2.2.4 初始内力效应 / 42

2.2.5 自锚式斜拉-悬索协作体系桥力学性能研究 / 43

2.2.6 小 结 / 52

2.3 自锚式斜拉-悬索协作体系桥端吊索疲劳问题研究 / 53

2.3.1 辅助墩的作用 / 53

2.3.2 交叉吊索的作用 / 54

2.3.3 主梁抗弯刚度影响分析 / 55

2.3.4 其他措施 / 55

2.3.5 端吊索疲劳计算 / 56

2.4 自锚式斜拉-悬索协作体系桥主梁过渡段内力研究 / 56

2.4.1 引 言 / 56

2.4.2 自锚式斜拉-悬索协作体系桥主梁过渡段平面模型的建立 / 57

2.4.3 结果及分析 / 59

第3章 自锚式斜拉-悬索协作体系桥动力行为分析 / 61

3.1 自锚式斜拉-悬索协作体系桥动力特性及结构参变量影响 / 61

3.1.1 引言 / 61

3.1.2 自锚式斜拉-悬索协作体系桥的动力特性分析 / 61

3.1.3 结构参数变化对动力特性的影响 / 67

3.1.4 小结 / 72

3.2 时程分析 / 73

3.2.1 时程分析法概述 / 73

3.2.2 桥梁非线性因素的主要来源 / 73

3.2.3 跨海大桥的时程分析 / 74

3.3 多点激励下随机地震响应分析 / 82

3.3.1 引言 / 82

3.3.2 随机地震动输入及空间变化效应 / 83

3.3.3 多点非一致激励结构动力方程的建立及虚拟激励法求解 / 88

3.3.4 结构响应的期望峰值计算 / 90

3.3.5 实例响应和结果分析 / 90

3.3.6 阻尼对结构动力反应的影响 / 103

3.3.7 自锚体系和地锚体系的随机地震响应对比分析 / 104

3.3.8 小结 / 106

第4章 模型试验研究 / 107

4.1 引言 / 107

4.2 大连湾跨海大桥模型试验 / 108

4.2.1 模型试验的目的 / 108

4.2.2 模型试验设计与制作 / 108

4.2.3 模型静载试验 / 109

4.2.4 小结 / 113

4.3 星海湾挑月桥模型试验 / 113

4.3.1 模型试验的目的 / 113

4.3.2 模型试验设计与制作 / 113

4.3.3 模型的试验过程 / 117

4.3.4 成桥模态试验 / 119

4.3.5 活载加载试验 / 123

4.3.6 模型误差分析 / 130

第5章 自锚式斜拉-悬索协作体系桥结构设计 / 132

5.1 加劲梁 / 132

5.1.1 钢桁架加劲梁 / 132

5.1.2 闭口钢箱加劲梁 / 133

5.1.3	分离式双箱钢加劲梁 / 134
5.1.4	叠合梁加劲梁 / 135
5.1.5	混凝土边主梁加劲梁 / 135
5.1.6	混凝土箱梁加劲梁 / 136
5.2	主 塔 / 136
5.2.1	主塔概述 / 136
5.2.2	主塔的结构形式 / 137
5.3	主 缆 / 138
5.4	斜拉索 / 139
5.4.1	斜拉索的构造 / 140
5.4.2	钢索的种类、构造和性能 / 140
5.4.3	锚 具 / 142
5.5	吊索及索夹 / 144
5.6	索 鞍 / 145
5.6.1	索鞍的分类 / 145
5.6.2	索鞍的构造 / 146
5.6.3	索鞍槽在纵向的曲率半径 / 147
5.6.4	索鞍的构造要求 / 147
5.7	锚 块 / 148
5.7.1	混凝土加劲梁主缆锚固系统 / 148
5.7.2	钢加劲梁主缆锚固系统 / 150
5.7.3	各种锚固系统的比较 / 150
第 6 章 实桥介绍 / 152	
6.1	庄河建设大桥设计 / 152
6.1.1	地质水文条件 / 152
6.1.2	工程概况 / 152
6.1.3	总体设计及构造的选择 / 153
6.1.4	理想索力计算 / 155
6.1.5	结构整体计算 / 158
6.2	大连市星海湾挑月桥设计 / 163
6.2.1	工程概况 / 163
6.2.2	总体设计及构造的选择 / 163
6.2.3	理想索力计算 / 169
6.2.4	小 结 / 174
参考文献 / 175	

1 绪 论

随着设计理论的完善、施工方法的改进、新材料的利用和社会经济的发展,越来越多的大跨径桥梁为人们所热衷,大跨径桥梁的建设在 20 世纪末进入了一个高峰时期。

大跨径桥梁多为缆索承重桥梁,所谓缆索承重桥梁是以缆(悬索桥的主缆)或索(斜拉桥的斜拉索)作为主要承重构件的桥梁。和其他桥梁结构相比,缆索承重桥梁更适合于向大跨度的方向发展,这是由缆索承重桥梁的特点决定的。缆索承重桥梁有两个重要特点:一是主要受力构件都是以受轴向力为主,缆和索主要受轴向拉力,桥塔和斜拉桥的加劲梁主要受轴向压力,相比于受弯构件,受轴向力作用的构件能够更好地发挥材料整个截面的利用效率;二是缆和索等受拉构件通常是采用高强钢丝制成,高强钢丝不仅强度大而且自重轻。

悬索桥是以主缆、桥塔和地锚作为主要受力构件的桥梁结构。活载由桥面通过吊杆传到主缆,再由主缆传递至地锚。传力途径简洁、明确,主缆全截面参与受力,材料利用率高。在悬索桥设计中,应当综合考虑主缆和加劲梁的刚度作用,可以得到较为合理的设计结果。随着悬索桥设计理论的发展,一大批大跨度的悬索桥相继问世。目前悬索桥的最大跨度为 1998 年建成的日本明石海峡大桥,如图 1.1 所示,跨度为 1 991 m,加劲梁为钢桁架梁,高度为 14 m。



图 1.1 日本明石海峡大桥

悬索桥的最大跨径虽然不断被刷新,但终有限值。因为当悬索桥的跨度进一步增大时,主缆的长度将显著增大,加劲梁高度增高,导致主缆和加劲梁的自重增大,再加上活载的作用,必须要有很庞大的地锚才能满足受力要求。如此一来,难以找到合适的地质条件来建造庞大的地锚体系;且悬索桥的刚度将随着跨度的增加而明显降低,所以,当跨度较大时,悬索桥的动力稳定性难以保证。

斜拉桥的主要受力部分是斜拉索、桥塔和加劲梁。斜拉索的竖向分力可以有效减小加劲梁在活载作用下的变形,相对于悬索桥而言,其结构的整体刚度较大,具有较好的刚度特性。随着超静定结构理论分析的发展和计算机的应用,20 世纪 50 年代之后,斜拉桥进入了一个新的发展阶段,其结构形式由稀索、中小跨度向密索、大跨度方向发展。密索体系的斜拉桥,斜拉索干扰加劲梁的振动,对整个桥梁结构起到减振作用,从而防止危险振动的形成。总结现代斜拉桥的特点:其具有造型美观、跨径布置灵活和施工干扰小等特点,并具有良好的力学性能、风振稳定性和经济性。目前世界上最大跨度的斜拉桥为 2008 年建成通车的中国江苏的苏通长江公路大桥,该桥主跨 1 088 m,如图 1.2 所示。斜拉桥的跨度超过 1 000 m 后,施工时最大悬臂将达到或超过 500 m,如此大的悬臂跨径将使得合拢前的稳定性难以保证;同时加劲梁内的轴向水平压力也会随着悬臂跨径的增大而迅速增加,致使加劲梁根部在近塔处会产生压屈失稳的现象,为了保证加劲梁的屈曲稳定,必须增大加劲梁的横截面,而当加劲梁的自重增大,斜拉索的索力也要增加,二者相互影响,降低了斜拉索承受活载的效率;再者,斜拉桥的桥塔高度(桥面以上部分)一般为其跨度的 $1/6 \sim 1/4$,当跨度很大时,桥塔将很高,而高耸的桥塔又会带来稳定性的问题和施工上的困难;此外,大跨度斜拉桥的斜拉索长度大,垂度效应明显也是影响斜拉桥向大跨径发展的又一制约因素。

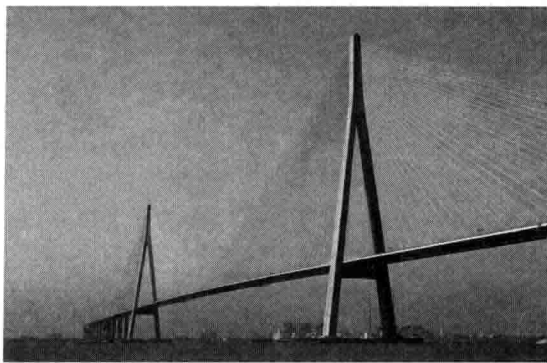


图 1.2 中国江苏苏通长江公路大桥

斜拉桥和悬索桥虽然都是以缆索作为主要承重构件的桥梁,但二者之间的差别却是很大的:斜拉桥加劲梁上的荷载是通过锚固点直接传递到斜拉索上,而悬索桥加劲梁上的荷载则是经由吊杆再传到柔性主缆,主缆要通过变形来承受荷载,所以两者的结构刚度有较大的差别;悬索桥的主缆锚固于地锚上,加劲梁不承受轴向力,而斜拉桥一般是自锚的,其加劲梁承受巨大的轴向压力;斜拉桥的刚度在很大程度上取决于斜拉索的刚度,所以,改变斜拉索的张力、间距和数量不仅可以调节加劲梁的截面内力,而且还可以改变整个桥梁的刚度,而悬索桥则没有这种功能。但是悬索桥的主缆利用率高,跨越能力相对较大。

综上所述,斜拉桥、悬索桥是目前世界上广泛采用的大跨径桥梁形式,但二者各有优缺点并制约了跨径的进一步增大。特别是随着世界范围内经济及交通事业的发展,为跨越海峡、江河和联系岛屿,需要建设多座大跨度桥梁。这些大桥工程将面临深水基础、软土地基、强台风等自然条件的影响,仅采用传统的单一斜拉桥或悬索桥已不能满足工程需要。为此,能够克服斜拉桥和悬索桥各自不足而综合二者优点的斜拉-悬索协作体系桥应运而生,使得桥梁向特大跨径发展成为可能。

斜拉-悬索协作体系桥以其卓越的结构性能和良好的社会效益引起了国内外不少的桥梁工程专家和学者的兴趣,在他们的努力下,完善了斜拉-悬索协作体系桥的计算模式和结构分析理论,并不断提出一些优秀的设计方案,如墨西哥海峡大桥方案、大贝尔特桥设计方案、伊兹米特桥设计方案、伶仃洋东航道桥方案、润扬大桥方案等。尽管在国内外斜拉-悬索协作体系方案多次地被提出,但由于各种原因,均没有能够付诸实施,而被结构体系更为简练、技术更为成熟的悬索桥或斜拉桥方案所取代。因此,斜拉-悬索协作体系在过去几十年的时间内没有得到更进一步的发展。

目前斜拉-悬索协作体系桥梁主要停留在方案设计阶段。所提出的方案,均为地锚体系,需要庞大的锚碇,特别在海上,施工难度大,工程造价高。大连理工大学桥梁工程研究所率先提出自锚式斜拉-悬索协作体系桥,不仅可以避免上述问题,而且经济性能好、对地形和地质状况适应性强,所以自锚式斜拉-悬索协作体系将成为大跨径桥梁方案中的一枝新秀。虽然自锚式斜拉-悬索协作体系桥与地锚式斜拉-悬索协作体系桥在形式上的差别仅是将主缆的锚固从地上的锚碇移到加劲梁端部,但结构的受力和施工方法因此发生了极大的变化。目前,无论是在静力、动力特性的理论研究方面,还是在设计和施工监控方面,人们对地锚式斜拉-悬索协作体系桥的研究已展开比较详细的研究。但是对于自锚式斜拉-悬索协作体系桥的研究,目前可检索到的文献资料寥寥无几。

1.1 斜拉-悬索协作体系桥的发展及研究现状

科学技术的发展历史表明,在两种学科的边缘往往会派生出来一种新的学科,焕发出崭新的异彩,斜拉桥与悬索桥之间同样如此。斜拉-悬索协作体系桥就是把悬索桥和斜拉桥这两种桥梁形式结合起来,形成的另外一种缆索承重桥梁。它既具有悬索桥跨越能力大的特点,又具有斜拉桥刚度较好的优点,能够充分发挥斜拉桥和悬索桥体系各自的优势,相互取长补短,不仅较大程度地提高了大跨度桥梁的跨越能力和自身的刚度以及桥梁结构的整体稳定性,而且提高了桥梁在施工和运营阶段的安全性,同时还可以有效地降低桥塔高度,减小锚碇的体积,可以使桥梁结构的跨度进一步地增大。

1.1.1 代表体系

从1883年美国的罗勃林(J. Roebling)为提高悬索桥的刚度和抗风性能而提出用拉索增强悬索体系的构想至今一个多世纪以来,国内外桥梁工作者对斜拉-悬索协作体系提出过各种各样的形式,概括起来主要有五种体系:罗勃林体系、狄辛格体系、斯坦因曼体系、林同炎公司提出的协作体系及吉姆辛体系。

(1) 罗勃林体系

19世纪下半叶,罗勃林曾设计了多座在当时属于世界最大跨径的悬索桥,同时研究了用斜拉索来提高悬索桥刚度的问题。1854年,Wheeling的一座悬索桥毁于风灾,使他认识到悬索体系刚度不足的缺点,激发他采用抗弯刚度大而且透风的加劲桁架和斜拉索来弥补单纯悬索体系的不足。随后,在布鲁克林桥(图1.3)的设计中,他成功地实现了这个构思,该

桥建成于 1883 年,是世界上最早的斜拉-悬索协作体系桥梁。其索缆布置如图 1.4 所示,该体系也被后人称为“罗勃林体系”。在这种体系中,悬索桥的吊杆全桥布置,只是在边跨和主跨布置斜拉索。这种体系是当时科学水平的必然产物,因为当时悬索桥很普遍,而斜拉桥尚未出现,因而在这种体系中以悬索桥为主,斜拉索只是作为悬索桥的辅助构件起加强作用。由于当时直觉和外观艺术更重于科学,所以罗勃林没有下意识地研究这种体系。虽然这种体系很古老,但是现在个别桥梁在施工以及今后扩展交通时,仍然采用这种体系,罗勃林体系的提出无疑是桥梁史上斜拉-悬索协作体系的一次极有价值的大胆尝试。



图 1.3 布鲁克林桥

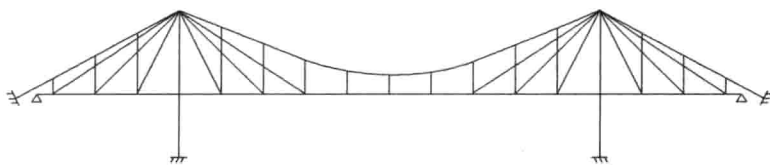


图 1.4 罗勃林体系

(2) 狄辛格体系及修正的狄辛格体系

1938 年,德国著名的桥梁设计师狄辛格(Dischinger)在为汉堡附近的一座铁路桥设计时再次引进了斜拉索来减少常规悬索桥在铁路重载下的挠度。他采用高强度钢丝在恒载下高压地工作来达到减少挠度的目的。其结构形式如图 1.5 所示,由塔顶伸出的辐射形斜拉索支撑主跨梁体的两边段,中段才由悬索支撑。这种体系中,斜拉索和悬索各司其职,是真正意义上的相互协作,而不像罗勃林体系中斜拉索只是用来加固桥梁。随后在科隆-梅尔海姆桥设计中也提出了这种体系方案。但是遗憾的是,由于种种原因,该种体系未被最终采纳。狄辛格提出的形式后来被称为狄辛格体系。该种体系当时没有被付诸实施,但是近代斜拉桥却在它的基础上发展起来了,而协作体系又一次被搁置。

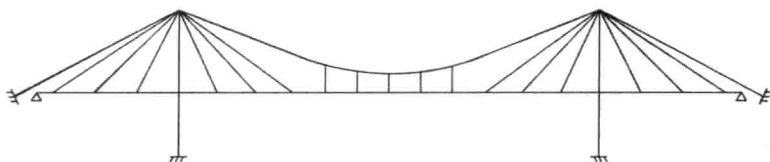


图 1.5 狄辛格体系

随着斜拉桥的发展和对斜拉桥研究的深入,设计人员逐渐认识到稀索体系有很多不足之处,现代的桥梁工作者在致力于斜拉-悬索协作体系研究时也倾向于把狄辛格体系中的斜拉部分采用密索形式,从而使结构具有较好的连续性,改造后的形式如图1.6所示。由于这种体系构思是根据狄辛格体系进行改造和发展得来的,因此称之为“修正的狄辛格体系”。



图 1.6 修正的狄辛格体系

(3) 斯坦因曼体系

1953年,德国的斯坦因曼(D. B. Steinmann)为意大利墨西拿海峡大桥所做的方案中,提出了一种较为新颖独特的斜拉-悬索协作体系方案,如图1.7所示。

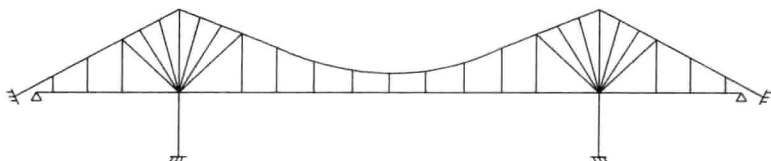


图 1.7 斯坦因曼提出的墨西拿海峡大桥方案

在此方案中,斯坦因曼采用了从悬索体系主缆向下集中锚固到塔根处的斜拉索布置形式,这种斜拉索增加了主缆的拉力;而在罗勃林体系中恰好相反,斜拉索是从塔顶辐射下来支承加劲梁,斜拉索分担了主缆所承担的荷载,因此主缆拉力有所减小。丹麦的尼尔斯·吉姆辛(Niels J. Gimsing)称布鲁克林桥中的斜拉索为“正拉索”,而把斯坦因曼方案中的斜拉索称为“负拉索”。采用这种负拉索后,虽然对加劲梁的受力没有直接影响,但可以减小主缆受力后的变形,所以能在一定程度上提高桥梁的整体刚度。遗憾的是,这种形式的吊拉组合索桥从未进入实施阶段。

(4) 林同炎公司提出的斜拉-悬索协作体系

1984年,林同炎国际咨询公司为直布罗陀海峡大桥提出了另一种斜拉-悬索协作体系方案,其布置形式如图1.8所示。

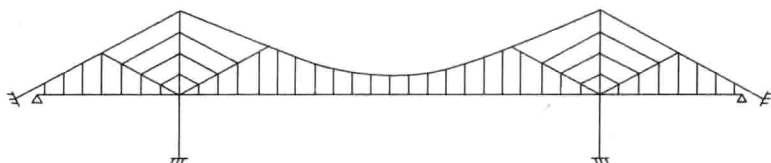


图 1.8 林同炎公司提出的直布罗陀海峡大桥方案

这种斜拉-悬索协作体系方案的结构特点是:用两个刚性斜撑支承桥塔附近的桥面荷载,主跨的中间部分由悬索体系承担。增加刚性斜撑后,极大地提高了桥梁的整体刚度,有利于桥梁结构的动力稳定性。但是在该方案中,桥塔高度比同跨径的悬索桥增高很多,高耸桥塔的施工问题与稳定性还有待进一步研究。

(5) 吉姆辛体系

丹麦的吉姆辛曾经对缆索承重桥梁做过较为系统的研究。他提出了一个索网式缆索承重桥的方案设想,如图 1.9 所示。

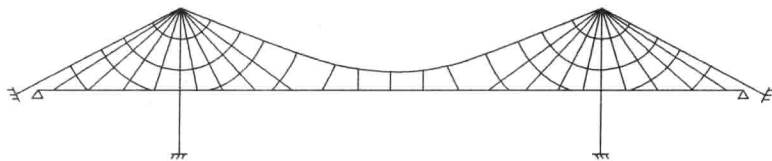


图 1.9 吉姆辛提出的索网式缆索承重桥方案

该方案是将悬索体系与部分地锚式的斜拉索体系混合在一起,在边跨仅用一根背拉索进入地锚,用较少的曲线形二次索代替较多的竖向吊杆,提高了其抗风稳定性。但这种想法仅仅是从成桥后的结构受力性能来考虑的。对部分斜拉索要改自锚为地锚的经济性,以及用较少的曲线形二次索,能否很好地利用悬索体系的承载能力等,都是有待进一步分析研究的问题。

1.1.2 国内外协作体系桥及方案

目前世界上保存最古老的斜拉-悬索协作体系桥是伦敦泰晤士河上的阿尔伯特大桥,由 R. M 奥迪希设计,始建于 1871 年,1873 年竣工,跨度组合 $35\text{ m} + 122\text{ m} + 35\text{ m}$,桥宽 12.5 m ,如图 1.10 所示。

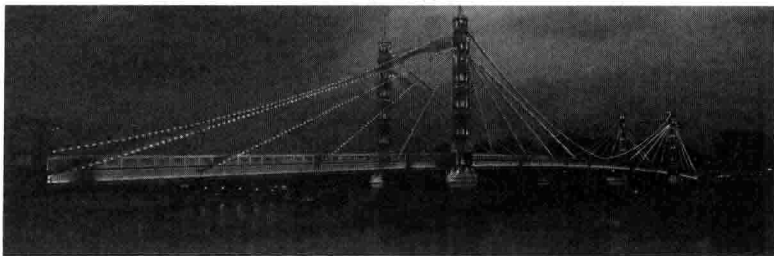


图 1.10 阿尔伯特大桥

后来,经过无数桥梁设计师的探索和努力形成了上述各种经典的协作体系。在这些理论研究的基础上,近年来国外很多跨海工程都提出斜拉-悬索协作体系桥方案,其中许多不失为很优秀的方案。

1976 年,在意大利墨西拿海峡大桥中提出主跨 $3\,300\text{ m}$ 的斜拉-悬索协作体系方案,如图 1.11 所示。在此方案中, $3\,300\text{ m}$ 主跨避免了在深水中修建墩桩基础,大大降低了施工难度,此外增加了斜拉索后,桥梁结构整体刚度提高,可以满足该桥公、铁两用的设计要求。

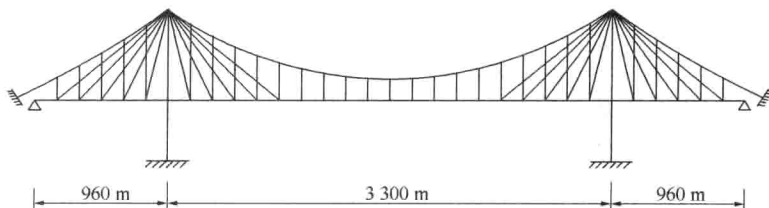


图 1.11 墨西拿海峡大桥斜拉-悬索协作体系方案

1978年,丹麦的大贝尔特桥的设计方案中曾提出了跨径为 $400\text{ m}+1\,500\text{ m}+400\text{ m}$ 的斜拉-悬索协作体系方案,如图1.12所示。该桥与罗勃林体系相似,但不同的是其设计概念不是用斜拉索来加固悬索桥,而是斜拉索与悬索两者有机协作来共同承担荷载。

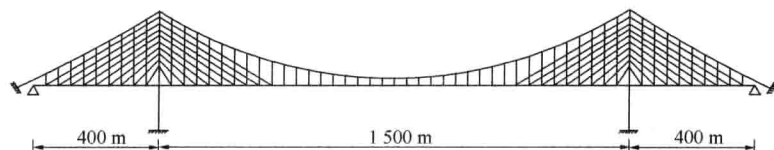


图 1.12 大贝尔特桥设计方案

20世纪90年代初,土耳其伊兹米特海湾桥的设计方案中也提出过主跨 $2\,000\text{ m}$ 的协作体系方案,如图1.13所示。该桥加劲梁高 4.33 m ,桥宽 34 m ,主跨悬索桥部分采用钢箱梁,斜拉桥部分为混凝土梁,可以充分发挥材料的长处。

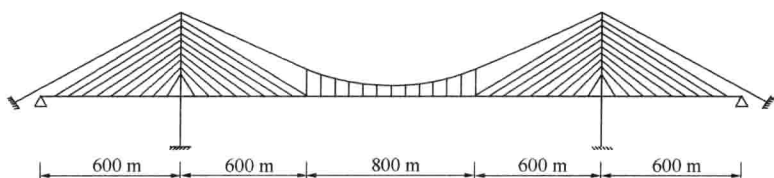


图 1.13 伊兹米特海湾桥设计方案

尽管国外的设计师们不止一次地提出斜拉-悬索协作体系方案,但由于各种原因,这些方案均没有能够付诸实施,而大都被结构体系更为简练、技术更为成熟的悬索桥或斜拉桥方案所取代。因此,斜拉-悬索协作体系在过去的几十年时间没有得到更进一步的发展。

伴随着我国交通事业的发展,江河海域上大跨径斜拉桥和悬索桥不断涌现,许多桥梁工作者们早就注意到这种斜拉-悬索协作体系桥,并相继开展了相关研究。贵州还修建了世界第一座现代意义的斜拉-悬索协作体系桥,近年国内的许多工程中也多次提出斜拉-悬索协作体系方案。

1991年,湖南公路局和湖南交通设计院就广东省的汕头海湾大桥提出了主跨 620 m 的斜拉-悬索协作体系方案,如图1.14所示。该桥桥位处水深 $10\sim 21\text{ m}$,细砂覆盖层厚达 300 m 。如果修建悬索桥,其锚碇费用是相当大的,而采用斜拉-悬索协作体系桥,其主缆拉力可大大降低,所以锚碇费用也相应降低。

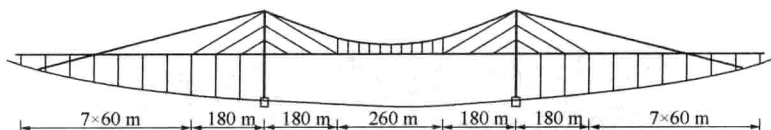


图 1.14 汕头海湾大桥设计方案

1993年,台湾高屏溪桥的研究方案中曾提出主跨 920 m 的斜拉-悬索协作体系方案,如图1.15所示。中跨两端各 210 m 为斜拉部分,中间 500 m 为悬索部分,有4根吊杆和拉索相交叉,梁高 6 m ,宽 30 m 。

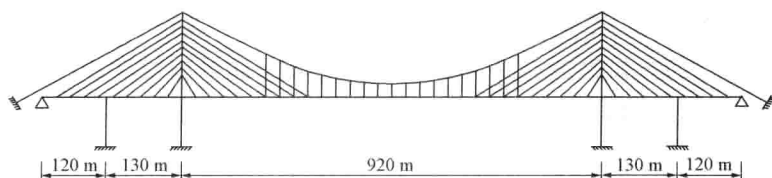


图 1.15 台湾高屏溪桥设计方案

1997 年 10 月,我国贵州乌江大桥竣工通车,乌江大桥就是采用斜拉-悬索协作体系,这标志着世界上第一座现代化的斜拉-悬索协作体系桥梁的诞生。该桥主桥跨径布置为 $66\text{ m} + 288\text{ m} + 66\text{ m}$,主跨 288 m ,悬索部分 168 m ,如图 1.16 和图 1.17 所示。斜拉索索间距 6 m ,每个桥塔设有 10 对斜拉索,每束斜拉索由 19×7 根 $\phi 5\text{ mm}$ 的钢绞线组成,主缆采用 19×127 根 $\phi 5\text{ mm}$ 的平行钢丝束组成,成索直径为 26.8 cm ,主缆垂跨比为 $1:10$,钢丝强度 $1\,670\text{ MPa}$ 。

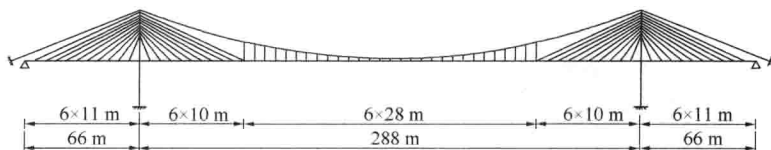


图 1.16 贵州乌江大桥立面图



图 1.17 贵州乌江大桥成桥

1997 年,广东伶仃洋东航道桥参选方案之一是主跨 $1\,400\text{ m}$ 的斜拉-悬索协作体系,如图 1.18 所示。此外江苏润扬长江大桥、上海黄浦江越江工程均提出了斜拉-悬索协作体系方案,如图 1.19 和图 1.20 所示。



图 1.18 广东伶仃洋东航道桥方案



图 1.19 江苏润扬长江大桥的斜拉-悬索协作体系方案

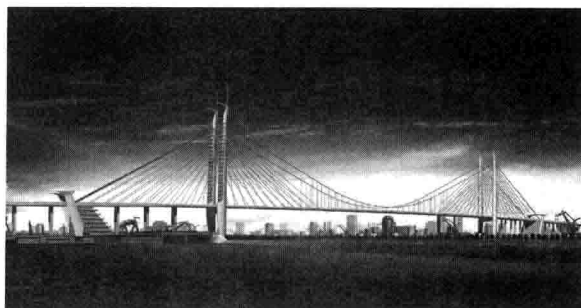


图 1.20 上海黄浦江越江工程方案

1.2 自锚式斜拉-悬索协作体系桥的研究现状

自锚式斜拉-悬索协作体系是由大连理工大学桥梁工程研究所在大连湾跨海大桥方案设计中首次提出,并由交通部将其列为西部交通建设项目课题。这种桥型具有斜拉-悬索协作体系桥的优点,同时无须修建庞大昂贵的锚碇,是特定条件下(桥塔高度有限制,无条件修建庞大的地锚且有一定跨度要求)大跨度桥梁中有力的竞争方案。由于大连湾地区有航空限制要求,并且主通航孔需要具有一定的跨度,因此该种桥型是最佳选择。国内可以检索到的该类桥型的相关研究结果甚少,只有大连理工大学桥梁工程研究所做过相关研究,而国外还未见有相关研究结果。

1.2.1 结构形式特点

自锚式斜拉-悬索协作体系桥是一种新型的缆索承重体系,由主缆、斜拉索、吊杆、加劲梁、主塔及基础组成。结构特点是在前述斜拉-悬索协作体系基础上省去地锚,将主缆锚固于梁上形成自锚式斜拉-悬索协作体系。

自锚式斜拉-悬索协作体系桥与悬索桥相比有如下优势:

- (1)不需要修建锚碇,不仅降低了造价,而且减少大体积混凝土施工的困难和风险,缩短了工期;
- (2)因受地形和地质条件限制小,可结合地形灵活布置;
- (3)不必全部用钢梁,斜拉部分可以采用混凝土梁,可以充分发挥混凝土的抗压特性,并